

文章编号: 1001-1455 (2001) 01-0047-06

柱形容器开口泄爆过程中压力发展特性的实验研究

胡 俊, 浦以康, 万士昕, 贾 复

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要: 在体积为 0.025m^3 的柱形容器中, 采用底端中心点火方式, 对 4.1% 的丙烷-空气、9.5% 甲烷-空气预混气的顶端开口泄爆过程进行了实验研究。实验结果给出了不同泄爆面积和不同泄爆压力条件下容器的内压力发展历史。就不同泄爆条件对容器内爆炸发展产生的影响进行了讨论。

关键词: 爆炸; 开口泄爆; 泄爆压力; 泄爆面积

中图分类号: O389; X932 **文献标识码:** A

1 引 言

“开口泄爆”是防止工业生产过程中气体、粉尘发生毁灭性爆炸灾害的一种有效减灾技术手段。近几十年来, 基于大量的实验数据与观测, 逐渐形成了供工程应用的开口泄爆设计规范^[1, 2], 但由于缺乏恰当的理论指导, 泄爆工程虽然耗费了巨大的人力物力, 而应用的把握性、通用性却都不能令人满意。迄今为止, 还没有一套较为全面、有效的泄爆理论来指导开口泄爆设计^[3]。

由于开口泄爆是一个耦合了可燃介质流动与热化学反应的复杂的非定常过程, 受到燃料性质、容器形状、流动状态、泄爆口位置、面积、泄爆压力等诸多因素的影响, 因此大多数研究工作的重点都放在具有代表性的典型形状容器(如球形、方腔形、柱形)的泄爆机理上。

对于球形或长径比接近 1 的方形容器的中心点火开口泄爆过程, Bradley 等^[4]的研究工作较具有代表性, 他们从等容绝热燃烧模式出发, 加入对泄爆过程进行的热力学平衡考虑。即: 从泄流气体的质量、能量平衡出发, 按照气体泄流率不小于容器内气体生成率的泄爆条件, 给出开口面积、容器体积和泄爆压力等参数的关联公式; 在此基础上, 后续研究^[5~8]为考虑泄爆过程对容器内燃烧状况(如燃烧速率、火焰面面积)的影响, 加入了湍流加速影响因子、燃烧不稳定性影响因子和火焰面变形系数等经验参数, 对泄爆设计的关联公式进行了修正。但由于经验参数的不确定性和不同容器中泄爆发展的差异性, 将这些公式应用于不同形状的容器时, 其设计效果不能令人满意。对于大长径比($L/D > 4$)的柱形容器, 其容器内的等容爆炸过程(如火焰面的发展传播变形、爆炸发展的两阶段性)、泄爆过程(如轴向流动对容器火焰变形和燃烧速率的影响), 较之球形、方腔容器内的爆炸、泄爆过程有较大差异。Nagy^[9]曾比照球形容器内泄爆过程的分析方法, 采用平面火焰假设, 对柱形容器内的泄爆过程进行了理论分析, 但由于真实泄爆过程(如压力发展、火焰面变形等)与理论假设的差异, 其理论结果与实验数据有较大差异。目前对大长径比柱形容器开口泄爆的研究从实验观测到机理探讨都还相对缺乏, 研究工作还必须从基本的实验研究入手。

本研究工作的目的, 就是对大长径比柱形容器的泄爆过程进行实验观测以提供基本实验数据。研究内容包括: 设计一套柱形容器开口泄爆的实验装置, 实现对泄爆过程压力历史的测量, 对火焰面发展

* 收稿日期: 2000-06-20; 修回日期: 2000-08-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(19772060)

作者简介: 胡 俊(1972—), 男, 博士研究生。

演化进行直接光学观测;在此基础上探讨大长径比柱形容器泄爆过程中压力、火焰面的发展变化特点与泄爆流动之间的内在联系机制,为泄爆机理研究提供合理的模型。在本文中,重点对不同开口面积与泄爆压力下柱形容器内压力变化特征及可能的机理进行探讨,火焰面的演化观测将另文报导。

2 实验装置、实验步骤与实验内容

开口泄爆实验系统由配气系统、柱形爆炸容器、点火与泄爆控制系统、监测与数据采集系统构成,如图 1 所示。

为便于对泄爆过程中火焰的发展变形进行高速光学观测记录,柱形爆炸容器采用透明的有机玻璃制成。容器长 $L = 1\text{m}$,内径 $D = 180\text{mm}$ ($L/D = 5.6$),管壁厚 10mm,管侧壁开有一系列的安装孔和进、排气口,底端封闭,顶端置有不同面积圆形泄爆口的法兰结构。为考查泄爆口面积的影响,实验中采用了直径分别为 50、80、100mm 的三个泄爆口,泄爆口用不同厚度的特殊玻璃纸封闭。实验点火采用高压电火花点火;实验容器内气体采用长时间底部充入顶部排出置换,气体浓度由流量计控制;容器内压力由安装在容器侧壁的压电式传感器监测,破膜监测信号和压力信号由高速数据采集板采集,数据采集频率为 10kHz。为了在指定压力准确、快速地开口泄爆,专门设计了由压力比较电路、快速放电电路组成的泄爆控制系统。泄爆封口的薄膜材料采用特定的玻璃纸,其表面粘贴有十字形破膜热丝。压力比较电路通过压力传感器,实时比较容器内压力与设定泄爆压力,给出泄爆触发信号,通过破膜热丝快速大电流融膜泄爆;泄爆口放置了监测探针,泄出气流冲击探针,产生的破膜监测信号可准确确定开口时间。

开口泄爆实验步骤为:首先启动实验控制程序,高速数据采集板开始采集容器内压力信号,检测泄爆信号;程序在设定的点火时刻触发高压点火电路点火爆炸;当容器内压力上升至预定破膜压力,压力比较电路发出信号触发破膜电路,通过十字形破膜热丝快速融膜泄爆;同时控制程序采集泄爆监测探针的破膜时间信号。实验中采用了 4.1% 的丙烷-空气预混气和 9.5% 的甲烷-空气预混气作为工作介质,实验内容及条件见表 1 (以下讨论的压力均为超过环境压力的超压)。

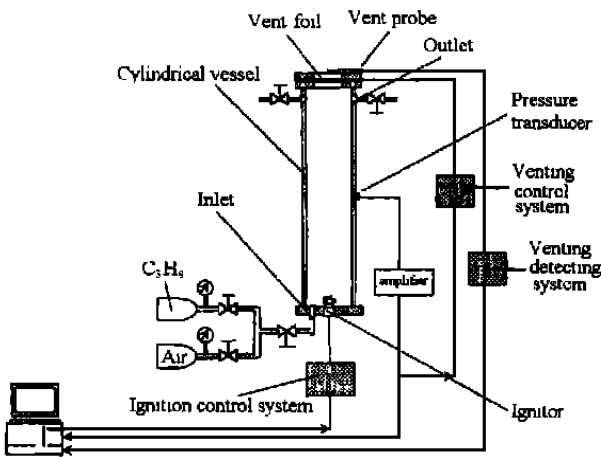


图 1 柱形容器开口泄爆实验装置
Fig. 1 Experimental device of explosion venting
in the cylindrical vessel

表 1 实验内容及实验条件
Table 1 Experimental parameters

实验气体	初 压	点火位置	泄爆方式	泄爆口直径/ mm	泄爆压力范围/ MPa
9.5 % CH ₄ -Air	环境压力	底端中心	顶端开口	50、80、100	0.01 ~ 0.10
4.1 % C ₃ H ₈ -Air	环境压力	底端中心	顶端开口	50、100	0.005 ~ 0.46

3 主要实验结果

3.1 封闭容器中爆炸压力曲线

研究开口泄爆有必要首先获取封闭容器中容积爆炸压力曲线,它是研究泄爆特征的基础,提供了所考察燃烧物在给定容器内的容积燃烧特性,可为研究不同泄爆参数对容器内爆炸发展影响提供比较标准。

考虑到实验装置的安全问题,未进行完整的等容爆炸实验,而是在实验中设置了远高于普通工业泄爆标准的泄爆压力,使破膜前所获取的等容爆炸压力发展历史足以满足比较的需要。

图 2 是采用 4.1 % 的丙烷-空气预混气、泄爆压力设置为 0.46MPa、泄爆口直径为 $D_r = 50\text{mm}$ 时容器内压力和压力上升速率随时间发展曲线。

压力曲线上 C 点以左部分是典型的柱形容器等容爆炸压力曲线,它清楚地反映出爆炸发展两个不同阶段的特点^[10~12]:从 $t = 0$ 点火开始至 A 点,即压力上升速率(dp/dt)达到第一个极值,为绝热燃烧阶段;其后为非绝热燃烧阶段。 B 点所标识的 dp/dt 的第二个极值与 Tulip 火焰(一种典型的火焰面向传播方向反向凹陷的现象)的出现相关,火焰的变形、增大进一步加剧了燃烧。其后压力继续上升,直至 C 点,压力达到 0.46MPa 后,泄爆口开启,压力迅速下降。

3.2 泄爆压力对泄爆过程中容器内压力的影响

首先考察较小泄爆面积的情形。图 3 给出了采用 4.1 % 的丙烷-空气预混气、泄爆口直径 $D_r = 50\text{mm}$ 时(泄爆口面积与容器横截面积之比 $V_r = 7.7\%$),不同泄爆压力下容器内泄爆过程的压力发展历史。

从图中曲线可以看到,自点火时刻($t = 0$)开始,四条 $p-t$ 曲线彼此重合、共同组成了体现泄爆前的等容燃烧特性的 $p-t$ 关系,也表明了我们实验的重复性。随着泄爆口开启,四个泄爆过程随泄爆压力设置值的递增,依次与等容燃烧曲线偏离,表现出泄爆过程的压力演化特征。当泄爆压力较低(分别为 0.02、0.04MPa)时,重要的特点是,泄爆口开启后压力一般并不立即下降,对于低泄爆压力值,压力甚至继续上升;如泄爆压力为 0.02、0.04MPa 的曲线所示,其压力分别继续上升至 0.06、0.07MPa 后开始下降,所达到的最大爆炸压力比泄爆设定值高 1.7~3 倍。当泄爆压力为 0.07MPa 时,开口后压力几乎不再上升,在缓慢上升至 0.074MPa 后压力下降。当泄爆压力进一步升至 0.18MPa,泄爆口开启后,压力立即下降,然而随着爆炸发展,压力又有重新回升的可能,实验中回升至 0.195MPa,其后压力单调衰减至环境压力。泄爆后压力可能继续升高是小泄爆面积的最大特点,亦是工程设计中需特别注意的。

对照较大泄爆口时(泄爆口直径 $D_r = 100\text{mm}$, $V_r = 30.8\%$),不同泄爆压力下容器内压力的变化另有特点,如图 4 所示。总的特征是:泄爆后压力立即下降。对于泄爆压力为 0.005、0.02、0.05MPa 的几种情况,其压力发展历史有相似之处:从 $t = 0$ 点火至达到各自泄爆压力前,压力变化很好地符合了等容燃烧规律。泄爆口开启后,容器内压力立即下降,随后压力又重新上升,形成了压力的双峰现象,在 $t = 62\text{ms}$ 左右,三条压力曲线几乎同时达到第二峰值,随后压力急剧下降至环境压力。对较高的泄爆压力(0.08MPa),开口后其压力立即下降,但相应的第二个压

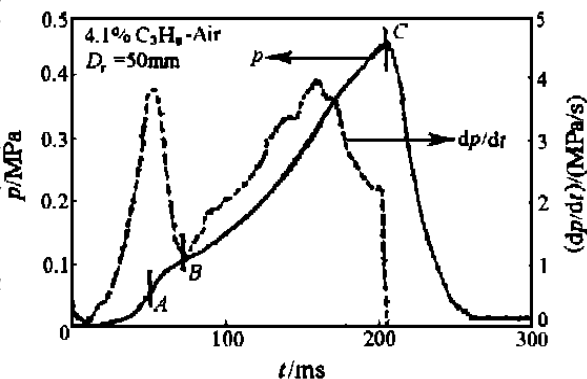


图 2 等容爆炸压力曲线(C 点以左部分)

Fig. 2 Pressure and its charge rate versus time under constant volume

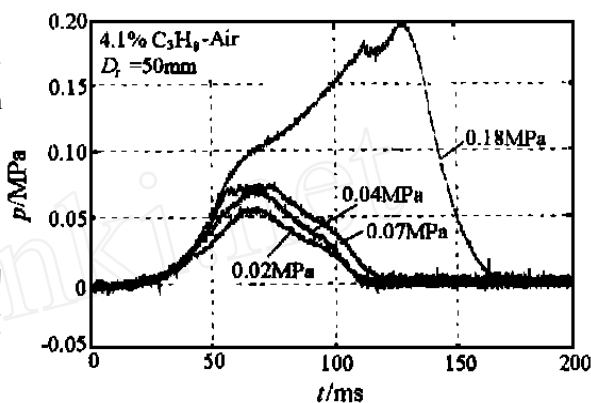


图 3 不同泄爆压力下容器内爆炸压力发展曲线

Fig. 3 Vent pressure versus time at different failure pressures

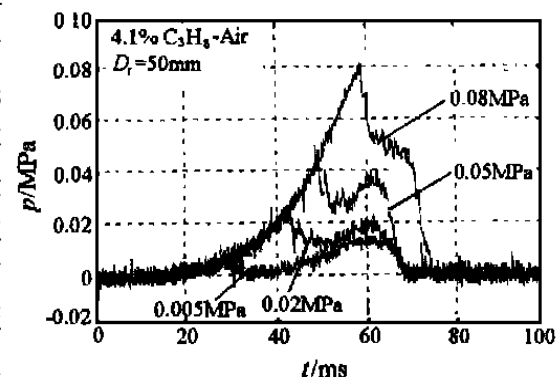


图 4 不同泄爆压力下容器内爆炸压力发展曲线

Fig. 4 Explosion pressure in vents versus time at different failure pressure

力回升退化成为一个阶梯形平台:在 $t = 61\text{ms}$ 左右,压力下降变缓,近似保持在 0.050MPa ,至 70ms 时急剧下降至环境压力。

3.3 泄爆口面积对泄爆过程容器内压力变化的影响

采用 9.5% 的甲烷-空气预混气,考察了泄爆面积对容器内压力发展变化的影响。结果示于图 5,图中曲线 a 、 b 、 c 分别代表泄爆口直径为 100 、 80 、 50mm ($V_r = 30.8\%$ 、 19.7% 、 7.7%),泄爆压力设置为 0.037MPa 时的压力-时间曲线;曲线 d 代表泄爆口直径为 50mm 、泄爆压力为 0.1MPa 时的情形。

从图 5 我们清楚地看到从 $t = 0$ 点火时刻到泄爆口开启,三条压力曲线彼此重合,反映着同一等容爆炸过程,再次表明了本实验系统良好的重复性。当容器内压力上升到指定的泄爆压力 (0.037MPa) 时,泄爆口打开 ($t = 60\text{ms}$ 左右),曲线 a 、 b 、 c 及 d 代表了不同开口面积情形下的泄爆过程。对于小泄爆口 (直径为 50mm , 曲线 c), 泄爆口开启后,容器内压力继续上升至设置泄爆压力值的约 2 倍 (0.066MPa), 然后开始单调下降,直至与环境压力平衡;当泄爆口直径为 80mm (曲线 b) 和 100mm (曲线 a) 时,泄爆口开启后压力均立即下降,其中较大泄爆面积的压力 (曲线 a) 下降得更快些。曲线 b 在下降至 0.03MPa 时,压力又重新回升,形成了压力的双峰现象,而曲线 a 则只有压力下降变缓的一段压力平台阶段。两条曲线在经历了第二压力峰值后都单调下降至环境压力。

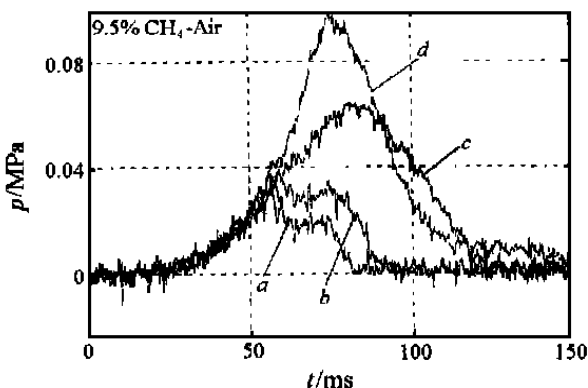


图 5 相同泄爆压力、不同泄爆口面积时容器内爆炸压力发展曲线

Fig. 5 Explosion pressure in vents versus time at same failure pressure through different vent area

4 讨 论

就泄爆的工程目的而言,关键问题之一是实施泄爆后容器内压力随时间的发展。概略地说,开口泄爆过程中容器内压力随时间的变化主要是两个过程相互作用的综合效果:一是容器内由于燃烧而致的气体的净生成量 (即燃烧生成的已燃气与消耗的未燃气体积之差),它主要由火焰面面积与燃烧速率决定;另一是气体从泄爆口流出的泄流量,它由泄爆口大小和容器内压力等决定。下面我们简要讨论一下这两个过程,以便对前述实验结果的物理机制有所认识。

4.1 泄爆时刻容器内压力上升速率与泄流引起的压力下降速率的估计

泄爆口开启前,容器内压力随时间的发展遵从等容燃烧规律,这个规律清楚地反映在图 2 及图 3~5 中泄爆前的压力曲线部分。这些曲线清楚地给出了在等容燃烧阶段由于燃烧造成的容器内压力随时间的上升和上升速率。泄爆口开启后,气体从泄爆口的流出造成容器内压力的下降。泄爆口开启瞬间,通过泄爆口的质量流速可按一维等熵流动估计为^[9]

$$\frac{dm}{dt} = \frac{A_v p_v}{T_v^{1/2}} \left\{ \frac{2}{R(\gamma - 1)} \left[\left(\frac{p_2}{p_v} \right)^{2/\gamma} - \left(\frac{p_2}{p_v} \right)^{(\gamma+1)/\gamma} \right] \right\}^{1/2} \quad (1)$$

式中: m 为质量, p_v 为容器内压力, p_2 为环境压力, T_v 为未燃气体温度, A_v 为泄爆口面积, γ 为未燃气比热比, R 为气体常数。或者以压力下降速率形式表示为^[9]。

$$\frac{dp}{dt} = \begin{cases} \frac{RT_v}{V} \left[1 - 918 A_v \left(\frac{p_v - p_2}{T} \right)^{1/2} \right] & (\text{亚音速泄流 } p_v \leq 1.89 p_2) \\ \frac{RT_v}{V} \left[-1.392 \frac{A_v p_v}{T_v^{1/2}} \right] & (\text{音速泄流 } p_v > 1.89 p_2) \end{cases} \quad (2)$$

为分析比较不同泄爆压力、泄爆面积下,泄爆口开启时刻容器内压力变化走向及其原因,首先,我们将图 2 中由测量结果给出的随时间变化的压力上升速率曲线,转换为随相应容器内压力变化的压力上

升速率曲线,示于图 6 中曲线 a ;其次,我们把根据公式(2)计算出的在不同开口泄爆面积下,由于泄流造成的压力下降速率(绝对值)随泄爆压力的变化规律也示于图 6 中(曲线 a 、 b 、 c)。这样我们就可以从压力上升与下降的速率对比关系来认识第 3 节中介绍的各种实验结果了。

4.2 泄爆过程中容器内的压力变化

从等容燃烧过程发展阶段(亦即泄爆工程感兴趣的 $0 \sim 0.2 \text{ MPa}$ 范围)的压力上升速率来看,它的典型特征是具有一个极大值和一个极小值,以及其后的增长阶段。这与火焰发展的特点密切相关^[12]。当我们把压力的上升和下降速率曲线(绝对值)相比较时,就可看到,较小泄爆口(直径为 50 mm , $V_r = 7.7\%$)的压力下降速率曲线(a)与等容燃烧压力上升速率曲线 a 有两个交点,当泄爆压力处于两交点间时,燃烧造成的压力上升占主导地位,泄流不足以抵消压力的净增长。这就是大多数小泄爆口实验在泄爆后容器内压力继续增长的原因。同样,如图 6 所示,随着压力的上升(燃烧的发展进入了相对平缓段),曲线 a 高于曲线 a' ,泄流造成的压力下降成为主导,因此图 5 中小泄爆口在 0.1 MPa 泄爆时(曲线 d),压力也表现为单调下降。较大泄爆面积下,对应的压力下降速率曲线全部高于压力上升速率曲线 a ,这就是对于较大开口泄爆时,泄爆压力普遍立即下降的原因。但是正如图 4 中曲线所示,较大开口面积的泄爆过程中压力仍有回升现象。这是泄爆过程中燃烧的特征所在。它应是泄爆后气体流动造成的湍流增强和流动造成的火焰面变形加大所引起的燃烧加强。这些现象定量的预言必须通过对泄爆过程中燃烧的发展、演化的细致刻画才能解决。为此,数值模拟是必要的,这些工作正在进行中。

5 结 论

泄爆过程中容器内压力的变化,是容器内燃烧状况与流动状况的综合反应,不同的泄爆压力对应着泄爆前容器内所处的不同爆炸发展状态;不同的泄爆口面积,使得泄爆后产生的泄流率不同,同时不同的泄流对容器内火焰面的发展、变形、燃烧速率影响不同。要正确刻画开口泄爆这样一个流动-燃烧的复合过程,需要进一步深入研究泄爆过程中容器内流动与燃烧的相互作用,以及火焰面的发展变形与压力变化机制。虽然从压力变化的信息中可以给出在不同泄爆条件下容器内爆炸过程的一些特点和发展趋势,但还必须借助于对实验过程的高速光学记录以及流场测量等手段,才有可能揭示出其内在的联系,这是我们正在进行的工作。

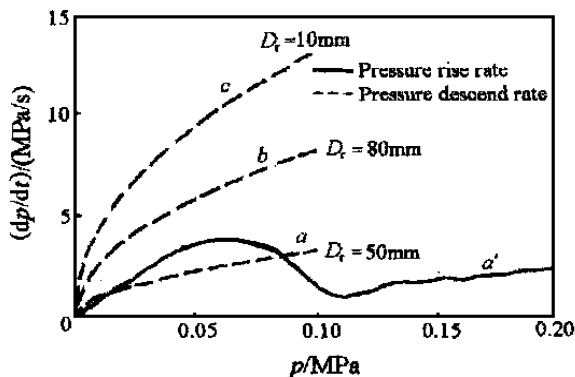


图 6 容器内压力上升速率与下降速率
随压力发展的变化

Fig. 6 Pressure rise and descend rate versus
pressure amplitude

参考文献:

- [1] VDI 3673 Part 1 ,Pressure Venting of Dust Explosions[S].
- [2] NFPA 68 ,Guide for Venting of Deflagrations Quincy [S].
- [3] Eckhoff R K.Dust Explosions in the Process Industries [M]. US:Butterworth-Heinemann Ltd ,1991. 467 —473.
- [4] Bradley D , Mitcheson A. The Venting of Gaseous Explosions in Spherical Vessels [J]. Combustion and Flame ,1978 ,32 (3) : 221 —255.
- [5] Chippett S. Modeling of Vented Deflagrations[J]. Combustion and Flame ,1984 ,55 (2) :127 —140.
- [6] Canu P, Rota R ,Carra S. Venting Gas Deflagrations a Detailed Mathematical Model Tuned on a Large Set of Experimental Data [J]. Combustion and Flame ,1990 ,80 (1) :49 —64.
- [7] Schumann St ,Rastogi A K. Dust Explosion Venting : Experiments and Numerical Modeling[J]. Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries ,1995 ,1 :231 —242.
- [8] Mercx W P M. Modeling and Experimental Research into Gas Explosions[J]. Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries ,1995 ,1 :333 —347.
- [9] Nagy J ,Verakis C. Development and Control of Dust Explosions[M]. New York :Marcel Dekker Inc ,1983. 166 —176.
- [10] Ellis O C de C. Flame Movement in Gaseous Explosive Mixtures[J]. Fuel in Science and Practice ,1928 ,7 :502.
- [11] Markstein G H. Nonsteady Flame Propagation[M]. Oxford :Pergamon Press ,1964. 113 —119.
- [12] Pu Y K. Fundamental Characteristics of Laminar and Turbulent Flames in Cornstarch Dust-air Mixture[D]. Montreal :McGill University ,1987. 105 —106.

Experimental Investigations of Pressure Development During Explosion Vent from Cylindrical Vessels

HU Jun ,PU Yi-kang ,WAN Shi-xin ,JIA Fu

(*Institute of Mechanics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 , China*)

Abstract : Experimental investigations were done during explosion vent in a 0.025m^3 vertical cylindrical vessel. 4.1 % Propane and 9.5 % methane air mixtures were used with central bottom spark ignition. When vent occurred at different failure pressure through different vent area , pressure histories were obtained at the vessel wall. Possible mechanisms for vent explosions are discussed.

Key words : explosion ; explosion vent ; failure pressure ; vent area